

Avances en la fabricación de células y módulos fotovoltaicos de silicio en capa fina mediante láser

S. Fernández Robledo⁽¹⁾, S. Lauzurica⁽¹⁾, J.J. García-Ballesteros⁽¹⁾, C. Molpeceres⁽¹⁾, G. Guadaño⁽¹⁾, F. Allen-Perkins⁽¹⁾, J.L. Ocaña⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro Láser UPM, Crta. de Valencia km. 7,3, 28031, Madrid (España)
Tlfn. +34 913 324 280 email: susana.fdez.robledo@upm.es

Resumen

El láser es un instrumento omnipresente en la fabricación de módulos fotovoltaicos. Los láser estándar para la interconexión monolítica de dispositivos de lámina delgada de a-Si son láser de estado sólido bombeados por diodo (DPSS) emitiendo en longitudes IR ($\lambda=1064$ nm) y en VIS ($\lambda=532$ nm). En este trabajo mostramos estudios de ablación de algunos materiales fotovoltaicos (óxidos conductores transparentes (OCT) y a-Si) con láser emitiendo en UV en el régimen de nanosegundos (ns). La afección térmica resultante en la ablación es menor, y por tanto se reduciría el riesgo de cortocircuitos en la interconexión monolítica, convirtiendo a las fuentes láser UV como herramientas prometedoras como alternativa a las fuentes estándar.

Palabras Clave: Procesado láser, silicio amorfo, ablación UV láser.

Abstract

Laser is an essential tool for photovoltaic modules manufacturing. Nowadays DPSS working at IR ($\lambda=1064$ nm) and VIS ($\lambda=532$ nm) wavelengths are standard tools for thin film module fabrication. In this work we present ablation studies of some photovoltaic materials (transparent conductive oxides (TCO) and a-Si) using nanoseconds (ns) laser sources emitting in the UV. The thermal affection is minimized, and therefore it would be reduced the short-circuit formation risk in the monolithic interconnection, demonstrating the potential use of ns laser sources emitting in the UV as promising alternative tools to the standard laser sources.

Keywords: Laser processing, thin film silicon, UV laser ablation.

1. Introducción

El interés despertado por la industria fotovoltaica, con un crecimiento en producción en torno al 40% por año, conlleva la búsqueda de tecnologías de fabricación de células solares más competitivas, aumentando su eficiencia y reduciendo costes de fabricación.

Hoy en día la tecnología dominante en el mercado fotovoltaico es la de silicio, condicionada en la práctica por notables problemas de suministro y encarecimiento de materia prima ante la fuerte demanda. Para suplir estas carencias, resurgen con fuerza las tecnologías que permiten ahorro de material, en especial las de lámina delgada de a-Si. Es en este campo donde el desarrollo de técnicas láser contribuye a la rentabilidad del proceso de fabricación.

La interconexión monolítica de módulos fotovoltaicos de a-Si implica tres pasos de scribing. Hoy en día, las herramientas estándar son láser DPSS trabajando a longitudes de onda IR y VIS. Sin embargo, estas fuentes conllevan surcos de ablación con cierta afectación térmica y como consecuencia con cortocircuitos. En anteriores trabajos ya demostramos algunas de las ventajas de utilizar UV [1-3]. Aquí revisamos los resultados de ablación de OCT (óxido conductor transparente), ITO y Asahi-U, de a-Si y la ablación selectiva de un electrodo trasero de ZnO sobre a-Si.

2. Técnicas experimentales

2.1. Fuentes Láser

El estudio de ablación selectiva desarrollado en este trabajo se ha llevado a cabo en las instalaciones de micromecanizado láser disponibles en el Centro Láser de la UPM.

La estación de micromecanizado ML-100 integra una fuente láser de excímero (KrF, 248 nm, ATL Laser Technik SP300i) y otra fuente láser de estado sólido bombeado por diodos (DPSS), (Nd:YVO₄, 355 nm, HIPPO de Spectra Physics) (Tabla 1). Ambas fuentes láser trabajan en el régimen de nanosegundos (ancho de pulso).

Tabla 1. Características principales de las fuentes láser empleadas en este trabajo.

	Excímero (KrF)	DPSS 3w
LÁSER		
Longitud de onda (nm)	248	355
Duración del pulso (ns)	3-7	< 12 (@50kHz)
Forma de haz/modo	Rectangular (3.5 x 6 mm)	TEM ₀₀
Frecuencia de operación	0 – 300 Hz	15 – 300kHz
Potencia Media (W)	0.3-5 (@300 Hz)	5 (@50 kHz)

El sistema de posicionamiento de la estación ML-100 combina seis ejes. La resolución de cada uno de los ejes lineales XY es de 0.1 µm, resultado una precisión total en el área de trabajo XY (100 x 100 mm) de 1 µm. El eje Z, se utiliza para controlar el foco. Se integran además tres ejes rotatorios para procesamiento de piezas en 3-D. La esfera de confusión del sistema completo es de 50 µm.

2.2. Preparación de las muestras

Se estudió la ablación de láminas de a-Si crecido sobre vidrio por depósito químico en fase vapor asistido por plasma (PECVD) en el CIEMAT, y por depósito químico en fase de vapor con hilo caliente (HWCVD) en el departamento de Física Aplicada y Óptica de la Universidad de Barcelona (UB).

Las láminas de OCT estudiadas corresponden a Asahi-U® comercial ($\text{SnO}_2\text{:F}$) e ITO ($\text{SnO}_2\text{:In}_2\text{O}_3$) crecido por pulverización reactiva por magnetrón RF en el CIEMAT.

Las láminas de ZnO fueron depositadas en la UB como electrodos traseros sobre muestras formadas por a-Si sobre OCT crecido en vidrio, desarrollando así células solares “incompletas” (sin unión p-n).

2.3. Técnicas de caracterización

La caracterización morfológica y los perfiles de ablación se obtuvieron con un microscopio confocal de barrido láser (CLSM) Leica ICM 1000. La resolución final en la dirección axial de dicho microscopio viene determinada por la longitud de onda del láser de diodo junto con la apertura del objetivo y el diámetro del pinhole. Mediante esta técnica se pueden obtener imágenes 3D moviendo el plano focal y obteniendo “láminas ópticas” que luego se superponen dando lugar a una pila 3D de imágenes que puede ser procesada digitalmente.

La precisión estimada de la medida en el eje z mediante cálculos teóricos es de 20 nm, aunque en la práctica las propiedades ópticas (reflexión) de la muestra influyen también en dicho valor.

Se incluyen también imágenes SEM y EDX para una mejor comprensión de la morfología de los canales creados en el proceso de ablación y para obtener información cualitativa acerca del proceso de ablación selectiva.

Por último, se determinaron los umbrales y las curvas de ablación comparando las alturas promedio de la zona irradiada respecto al nivel de referencia del material no tratado. Dependiendo del régimen de irradiación diferentes técnicas deben ser aplicadas [3-4].

3. Resultados

3.1. Ablación UV de OCT

Se logró ablación completa de surcos estrechos (en torno a $25\ \mu\text{m}$) de OCT sobre un sustrato de vidrio sin dañar el sustrato (Figura 1). La resistencia medida entre las dos áreas separadas por el surco fue superior a $\text{k}\Omega$.

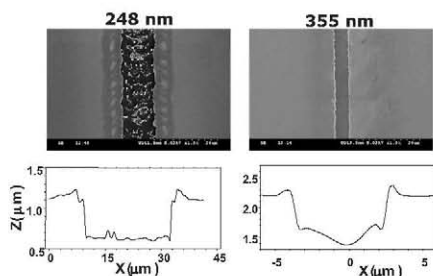
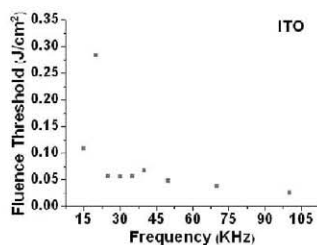


Figura 1. Imágenes SEM y perfiles obtenidos por CLSM de los surcos formados en el proceso de ablación en ITO a 248 nm (izq) y a 355 nm (der).

Los parámetros de proceso en el caso del láser de excímero fueron una velocidad de proceso de $1\ \text{mm/s}$, una energía por pulso de $5\ \text{mJ}$ y una frecuencia de $300\ \text{Hz}$. En el caso del DPSS se utilizó una potencia media de $0.04\ \text{W}$, una frecuencia $50\ \text{kHz}$ y una velocidad de proceso de $20\ \text{mm/s}$.



Gráfica 1. Umbral de ablación a diferentes frecuencias para irradiación DPSS a 355 nm.

El umbral de ablación del ITO para el láser de excímero es en torno a $0.5\ \text{J/cm}^2$, mientras que para el DPSS encontramos una fuerte dependencia del umbral de ablación con la frecuencia (Gráfica 1).

Los excelentes resultados obtenidos en los surcos a $355\ \text{nm}$ están probablemente relacionados con la energía característica de los fotones utilizados ($E_{355}=3.49\ \text{eV}$).

También se obtienen excelentes resultados para el Asahi-U, con una zona térmicamente afectada en torno al surco despreciable.

3.2. Ablación UV de a-Si y nc-Si

Los umbrales de ablación para muestras de a-Si (crecidas por PECVD) que son irradiadas a 248 nm son similares a las obtenidas para las muestras de OCT, variando desde 0.5 a 0.9 J/cm² dependiendo del espesor de a-Si. Sin embargo, las características morfológicas son pobres comparadas con las del OCT (Figura 2).

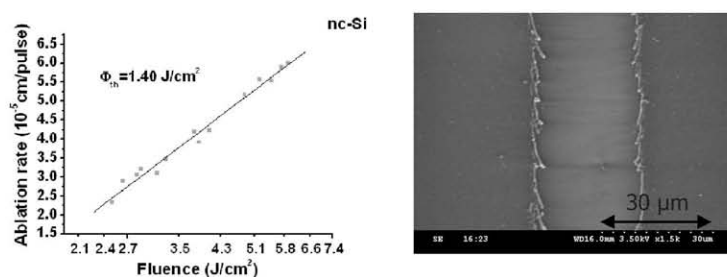


Figura 2. Curva de ablación para obtener el umbral de ablación de nc-Si a 248 nm (izq) e imagen SEM de a-Si:H (der).

Por otra parte, los umbrales de ablación del a-Si a 355 nm están por debajo de los umbrales de ablación correspondientes a OCT, con valores entre 0.08 J/cm² (a 15 kHz) y 0.03 J/cm² (a 100 kHz).

3.3. Ablación selectiva UV

En este apartado presentamos resultados preliminares de la ablación selectiva de lámina sobre lámina a 248 nm. En el proceso introducimos gas de aporte, que es una variable decisiva para conseguir mejores resultados.

La ablación de ZnO se logró con un solape del 75%, una energía por pulso de 5.7 J/cm², y a 2.5 bares de Ar puro como gas de aporte. Se consiguió aislar eléctricamente con estos parámetros. Por otra parte, en las imágenes de EDX de la Figura 3 puede verse que en el surco no hay ZnO, y que por tanto la ablación selectiva fue adecuada.

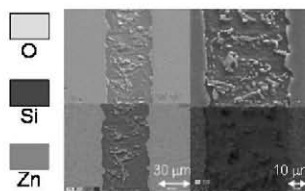


Figura 3. Imágenes SEM y EDX donde se aprecia la ausencia de ZnO en los surcos formados en el proceso ablación.

4. Conclusiones

Presentamos la posibilidad de llevar a cabo la conexión monolítica de módulos fotovoltaicos con irradiando con láser UV trabajando en el régimen de ns. Se ha comprobado, eléctrica y morfológicamente, como la ablación con UV de OCT, a-Si y ZnO resulta en una reducida afectación térmica y en surcos bien definidos. Se obtuvieron excelentes resultados para OCT (paso de scribing P1 en la interconexión monolítica de módulos de lámina delgada). También se lograron buenos resultados para la ablación selectiva del electrodo trasero de ZnO (paso de scribing P3) y en la ablación de a-Si.

Las fuentes láser utilizadas son totalmente comerciales, lo que reafirma la potencial aplicación industrial de las técnicas desarrolladas.

5. Referencias

1. C. Molpeceres et al., *J Micromech and Microeng.*, **Vol.** (15) (2005), 1271-1278.
2. C. Molpeceres et al., *22nd EU PVSEC*, UV Laser Microprocessing of Thin Film structures based on a-Si:H, Milán, (2007)
3. C. Molpeceres et al., *Photonics for Solar Energy Systems*; Ed. Andreas Gombert; Proc. SPIE 6197, (2006)
4. P.T. Mannion et al., *Applied Surface Science*, Vol. (233) (2004), 275–287

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos de investigación NTS (ENE2004-07376-C03) y PSE-MICROSIL08.